双極熱パルス法による飽和砂土の NAPL 汚染度の推定*

諸泉利嗣**・繁澤和佳子**・佐々木長市***

Estimation of NAPL content in saturated sandy soil using dual-probe heat-pulse method

Toshitsugu MOROIZUMI **, Wakako HANZAWA ** and Choichi SASAKI ***

Abstract

The simple methods for estimating NAPL content in saturated sandy soil using a volumetric heat capacity have been proposed as a fundamental study for measuring the NAPL content in groundwater. A dual-probe heat-pulse method was used to measure the volumetric heat capacity. The estimations of NAPL contents which were obtained by substituting the measurements of volumetric heat capacity into its model did not have a better accuracy than those by the calibration equation between known NAPL content and volumetric heat capacity, but could be close to the known NAPL contents. The estimations of NAPL contents were greatly improved when the regression line between the measured and estimated volumetric heat capacities.

Key Words: Dual-probe heat-pulse method, NAPL content, Volumetric heat capacity, Volumetric heat capacity model

要 旨

地下水中の NAPL 汚染度を測定するための基礎的研究として、NAPL 汚染された飽和砂土の体積熱容量を測定し、その測定値から NAPL 含有量を簡易的に推定する方法について検討した。体積熱容量の測定には双極熱パルス法を用いた。体積熱容量の測定値をモデル式に直接代入する方法で求めた NAPL 含有率の推定値は、既知の NAPL 含有率と体積熱容量の測定値の関係式から求めた値ほど推定精度は良くなかったが、事前に NAPL 含有率と体積熱容量の関係式を求めておく必要がないので原位置においてある程度の傾向を把握するには便利な方法である。また、体積熱容量の測定値と推定値の回帰直線を用いた場合は、NAPL 含有率の推定精度は向上した。

キーワード：双極熱パルス法、NAPL 含有率、体積熱容量、飽和砂土

* 第61回農業土木学会中国四国支部講演会（2006年）において一部発表。

** 岡山大学大学院環境学研究科（ ）

Graduate School of Environmental Science, Okayama University

*** 弘前大学農学生命科学部

Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University

1. はじめに

石油系炭化水素や揮発性有機塩素系物質などの水に溶けにくい NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) による地下水汚染が世界的に深刻な問題となっている。地下水は、通常、人の目に触れることがないために、汚染の発見が遅れ、長期間にわたって汚染が進行する傾向にある。ガソリンスタンドや石油精製工場、廃棄物処分場などでの NAPL 汚染の早期発見、さらに NAPL 汚染された地下水の浄化過程をモニタリングするためには、NAPL の汚染状況を原位置で効率的に把握するための測定方法の開発が重要な課題である。

土壌・地下水中の NAPL 汚染度の測定法としては、サンプリングによる方法が一般的であるが、汚染度の変化を経時的に把握するには、人的労力や経費がかかるなどの問題がある。また、サンプリングの際に NAPL が人体に曝露される危険を含んでいる (Persson & Berndtsson et al., 2002)。

近年、土壌・地下水中の NAPL 汚染度の非破壊測定法として、誘電率法が研究されている (例えば、Redman & DeRyck, 1994; Persson & Berndtsson et al., 2002 Ajo-Franklin et al., 2004; 西垣ら, 2004; 登尾, 2005)。この方法は、土壌・地下水の誘電率を出力情報としてとらえ、その出力情報から水と NAPL の誘電率の差を利用して、土壌の内部情報としての NAPL 含有量を推定するという逆解析的方法と考えることができる。このように考えた場合、土壌・地下水からの出力情報を誘電率に限定する必要はなく、他の物理量を用いても内部情報としての NAPL 含有量の推定が可能になる。そこで、本研究では、この土壌からの出力情報として体積熱容量に着目し、水と NAPL の体積熱容量の差から NAPL 汚染された飽和砂土中の NAPL 含有量を推定しようとするものである。

NAPL 汚染土壌の熱特性に関する研究として、登尾 (2005) は、サーモ TDR プローブを用いて土壌の誘電率、電気伝導度、体積熱容量を同時測定し、不飽和土壌中の有機溶媒濃度の検出方法を検討した。また、望月ら (2007) はナタネ油を用いて油汚染土壌と未汚染土壌の熱伝導率を測定・比較することで、油汚染土壌の熱伝導率の特性を明らかにした。しかし、現在までのところ、土壌・

地下水の熱特性を用いて NAPL 汚染度を評価した研究例はそれほど多くはない。

本研究は、地下水中の NAPL 汚染度を測定するための基礎的研究として、双極熱パルス法を用いて NAPL 汚染された飽和砂土の体積熱容量の測定し、その測定値から飽和砂土中の NAPL 含有量の推定する方法について検討したものである。

2. 双極熱パルス法の理論

双極熱パルス (Dual-Probe Heat-Pulse) 法は、無限長の線熱源から短時間の熱パルスが放射状に伝導する際の熱伝導理論に基づいており、土壌の体積熱容量と熱拡散率を短時間で簡便に測定することができる。短時間熱パルスの供給終了後のある位置 (r)、ある時刻 (t) での温度変化は次式で表される (Kluitenberg et al., 1993; Bristow et al., 1994)。

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\alpha C} \left[E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)} \right) - E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha t} \right) \right], \quad t > t_0 \quad (1)$$

ここで、 ΔT : 温度変化 (K)、 q : ヒーターへの供給熱量 (Wm^{-1})、 α : 熱拡散係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 C : 体積熱容量 ($\text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1}$)、 r : 線熱源からの放射状方向距離 (m)、 t : 熱パルス供給開始時からの経過時間 (s)、 t_0 : 熱パルスの加熱時間 (s)、 $-E_i(-x)$: 指数積分関数である。なお、式 (1) の右辺 [] の第 2 項は、 $t \leq t_0$ の時の温度変化を表す。

この理論を用いると、無限長線熱源からある一定距離の所 (r) での温度変化を測定することにより体積熱容量 $C (\text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1})$ と熱拡散係数 $\alpha (\text{m}^2 \text{s}^{-1})$ を次式から推定できる (Bristow et al., 1994)。

$$C = \frac{q}{4\pi\alpha\Delta T_m} \left[E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_m-t_0)} \right) - E_i \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_m} \right) \right] \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{t_m - t_0} - \frac{1}{t_m} \right) \left/ \ln \left(\frac{t_m}{t_m - t_0} \right) \right. \quad (3)$$

ここで、 t_m : 最高温度に達するまでの経過時間 (s)、 ΔT_m : 最高温度変化 (K) である。

また、熱伝導率 $\lambda (\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1})$ は、次の関係式から求めることができる。

$$\lambda = \alpha \cdot C \quad (4)$$

土壌の熱的性質を測定するためには、電源からヒータープローブに一定電流を流して熱パルスが発生させ、測温プローブの温度変化を記録する。 ΔT が得られると、1点法 (Bristow et al., 1994)、全データ適合法および部分データ適合法 (Bristow et al., 1995) のいずれかの方法を用いて、土壌の熱的性質が決定できる。本研究では、非線形回帰計算の必要のない、最も簡単な1点法を用いて土壌の体積熱容量を求めた。

3. 体積熱容量の推定モデルと NAPL 含有率の推定法

土壌のような混合物質の体積熱容量は、体積分率によって重み付けをした個々の物質の体積熱容量の和となる。したがって、土粒子、水、空気、3相からなる土壌の体積熱容量は、次式のような線形関係で表される (de Vries, 1963)。

$$C = C_w \theta_w + C_s (1 - \phi) + C_a (\phi - \theta_w) \quad (5)$$

ここで、 C_s : 土粒子の体積熱容量 ($\text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1}$)、 C_w : 水の体積熱容量 ($\text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1}$)、 C_a : 空気の体積熱容量 ($\text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1}$)、 θ_w : 体積含水率、 ϕ : 間隙率である。

NAPL によって汚染された飽和土の体積熱容量は、土粒子、水、NAPL の3相になることから、式 (5) の空気の部分を NAPL 相に置き換えることで、次式のようになる。

$$C = C_w \theta_w + C_s (1 - \phi) + C_{\text{NAPL}} \theta_{\text{NAPL}} \quad (6)$$

ここで、 C_{NAPL} : NAPL の体積熱容量、 θ_{NAPL} : NAPL 含有率である。NAPL によって汚染された飽和土の場合、次式が成り立つ。

$$\phi = \theta_w + \theta_{\text{NAPL}} \quad (7)$$

間隙率 ϕ が既知ならば、式 (6) と (7) を連立することによって θ_{NAPL} を求めることができる。

同様に、土壌の熱伝導率の推定モデルを用いることも考えられるが、砂質土では乾燥領域において λ と θ_w の関係が非線形になること (登尾、2005)、構成物質の形状係数など必要なパラメー

タ (de Vries, 1963) が増えることなどから、本研究では熱伝導率の推定式は使用せず、より簡単な線形関係を表す式 (6) を用いた。

本研究では、上述の θ_{NAPL} の推定方法に加えて、既知の NAPL 含有率と体積熱容量の測定値の関係を用いる方法および体積熱容量の測定値と推定値の回帰直線を用いる方法についても検討した。

4. 実験方法

4.1 実験装置の概要

測定には、サーモ TDR プローブを使用した。これは双極熱パルス法と TDR 法で用いるプローブの形状や材質が類似している点に着目し、この2つのプローブの機能を1本にまとめようと開発されたものである (Noborio et al., 1996)。本研究では、2つの機能のうち双極熱パルス法の機能のみを用いている。プローブは、長さ0.1m、外径0.002mの3本のステンレス製中空ロッドから成り、その中央の1本には2つ折りにしたヒーター用電熱線をプローブの先端まで、T型 (銅-コンスタンタン) 熱電対をプローブの中ほどまでそれぞれ挿入し、両側の測温プローブには熱電対がプローブの中ほどまで挿入されている。プローブ間隔は0.006mとした。

実験システムは、上述のサーモ TDR プローブのほか、熱パルスを与える直流安定化電源 (DM-112MU、大倉電気製)、プローブの温度変化を記録するデータロガー (CR23X, Campbell Scientific Inc. Logan, UT) とパーソナルコンピュータからなる (図1)。

図1 双極熱パルス法の実験システム

Fig. 1 Schematic of the experimental system of dual-probe heat-pulse method

4.2 試料の作成と実験手順

供試土には、土粒子の密度が2.64の豊浦砂を用いた。NAPL には、LNAPL (比重の軽い油) としてヒマシ油を、DNAPL (比重の重い油) として HFE-7100 の2種類を使用した。表1にこれらの NAPL の基本的な物性値を示す。HFE-7100が地下水汚染の原因として取り上げられている TCE (トリクロロエチレン) に物性が類似していることや、ヒマシ油、HFE-7100ともに人体に無害であることなどから、この2つの NAPL を選定した。実験は、NAPL 含有率と体積含水率の和が間隙率 ($\theta_{\text{NAPL}} + \theta_w = \phi$) となるように NAPL 含有率を 0、0.08、0.13、0.18、0.23、0.28、0.33、0.38、0.43 に設定し、9通りの組み合わせで行った。試料は、上述の含水率に調整した NAPL と蒸留水を豊浦砂に均一になるように混ぜ、390cm³ (13×6×5 cm) のアクリル製カラムに充填した。なお、HFE-7100は、揮発性に富み、かつ密度が水よりも大きいため、試料混合後できるだけ速やかに測定を行った。

試料を充填したカラム中央にサーモ TDR プロブを水平に挿入し、プロブのヒーター部に 6 V、20秒の熱パルスをかけ、ヒーター部から 0.006m 離れた測温センサー部で土壌の温度変化を測定 (図2) した後、式 (2) と式 (3) を用いて体積熱容量を求めた。実験は、室温20~25℃の範囲内で行った。

5. 結果と考察

5.1 体積熱容量と NAPL 含有率の関係

双極熱パルス法を用いて求めた体積熱容量と NAPL 含有率の関係を図3に示す。LNAPL、DNAPL ともに、NAPL の増加 (土壌水の減少) と

表1 NAPL と水の主な物性値

Table 1 Physical properties of NAPL and water

	体積熱容量 (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	粘性係数 (Pa·s)	密度 (×10 ³ kg m ⁻³)
ひまし油 (20℃)	1.99	0.7 (25℃)	0.961
HFE-7100	1.78	5.8×10 ⁻⁴	1.520
水 (20℃)	4.18	0.001	0.998
豊浦砂	1.92	—	2.64

ともに直線的に体積熱容量は減少した。これは、体積熱容量の小さい NAPL が体積熱容量の大きな水に取って代わったためである。体積熱容量と NAPL 含有率の回帰直線と相関係数 (R) は次のようになった。

$$\text{LNAPL: } C_m = -2.211 \cdot \theta_{\text{NAPL}} + 3.048 \quad (R = 0.97) \quad (8)$$

図2 測温センサー部での温度変化の一例 ($\theta_{\text{NAPL}} = 0.23$, $\theta_w = 0.20$)

Fig. 2 Variation of temperature in the sensor ($\theta_{\text{NAPL}} = 0.23$, $\theta_w = 0.20$)

図3 既知の NAPL 含有率と体積熱容量の測定値の関係

Fig. 3 Relationship between known NAPL content and measured volumetric heat capacity in saturated soils

$$\text{DNAPL: } C_m = -2.356 * \theta_{\text{NAPL}} + 3.053 \quad (R = 0.96) \quad (9)$$

ここで、 C_m : 体積熱容量 ($\text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1}$) である。

LNAPL、DNAPL ともに NAPL 含有率と体積熱容量の間にはよい相関があることがわかる。このことから、式 (8) 及び (9) を用いて土壌の体積熱容量の測定値から土壌中の NAPL 含有率を容易に推定することができる。

5.2 体積熱容量の測定値と推定値の関係

LNAPL と DNAPL を含んだ飽和砂土における体積熱容量の測定値と式 (6) による推定値の比較を図 4 に示す。LNAPL、DNAPL ともに推定値は測定値よりも過小評価された。LNAPL と DNAPL に対する測定値と推定値の直線回帰式とその相関係数は次のようになった。

$$\text{LNAPL: } C_e = 0.851 * C_m + 0.181 \quad (R = 0.97) \quad (10)$$

$$\text{DNAPL: } C_e = 0.870 * C_m + 0.147 \quad (R = 0.96) \quad (11)$$

ここで、 C_e : 式 (6) から推定した土壌の体積熱容量 ($\text{Jm}^{-3} \text{K}^{-1}$) である。相関係数が、LNAPL で 0.97、DNAPL で 0.96 となったことから、十分な精度で直線近似できたと考える。式 (10) および (11) は、後に述べる 5.3 の (3) において θ_{NAPL}

の推定に用いられる。

5.3 NAPL 含有率の推定

θ_{NAPL} の設定値に対する推定値の適合度を評価するために、次の 2 乗平均平方根誤差 (RMSE) と 1:1 直線に対する適合度 (r^2) を用いた (Legates & McCabe, 1999)。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (\theta_m - \theta_e)^2}{n_b}} \quad (12)$$

$$r^2 = 1.0 - \frac{\sum (\theta_m - \theta_e)^2}{\sum (\theta_m - \bar{\theta})^2} \quad (13)$$

ここで、 n_b : データ数、 θ_m : 設定値 (既知の値)、 θ_e : 推定値、 $\bar{\theta}$: θ_m の平均値である。

(1) 既知の NAPL 含有率と体積熱容量の測定値の関係式を用いる方法

式 (8) 及び (9) を用いて土壌の体積熱容量の測定値から土壌中の NAPL 含有率を推定した。こうして求めた θ_{NAPL} の推定値と設定値の比較を図 5 に示す。また、RMSE と r^2 を表 2 に示す。RMSE は、LNAPL で $0.031 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ($r^2 = 0.95$)、

図 4 体積熱容量の測定値と推定値の関係

Fig. 4 Relationship between the measured and the modeled volumetric heat capacities

図 5 式 (8) または式 (9) から求めた θ_{NAPL} と既知の θ_{NAPL} の関係

Fig. 5 Relationship between the known and the estimated NAPL contents using equations (8) or (9)

DNAPL で $0.037\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.93$) となり、LNAPL と DNAPL の両方について精度よく推定できた。この推定法は、比誘電率の測定から土壌水分量を求める Topp 式 (1980) と同様の考え方で、比誘電率の代わりに体積熱容量を用いて飽和土中の NAPL 含有量を推定する方法である。式 (8) および (9) は、キャリブレーション式に他ならない。

(2) 体積熱容量の推定モデルから直接 NAPL 含有率を求める方法

式 (6) の左辺に双極熱パルス法による体積熱容量の測定値を代入し、式 (7) と連立して θ_{NAPL} について解くことによって θ_{NAPL} の推定値を求めることができる。この方法は、(1) で述べた方法のように事前に θ_{NAPL} と土の体積熱容量の関係式を求めておく必要がない。この方法による θ_{NAPL} の設定値と推定値の関係を図 6 に示す。LNAPL と DNAPL とともに、推定値は全体的に設定値よりもやや小さな値となった。RMSE は、LNAPL で $0.076\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.68$)、DNAPL で $0.081\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.65$) となり、LNAPL の方が若干ではあるが精度よく推定できた。これらの結果から、この方法による θ_{NAPL} の推定値は (1) で述べた方法による推定値よりも精度は落ちる。しかし、事前に θ_{NAPL} と体積熱容量の関係式を求めておく必要がないので、原位置においてある程度の傾向を把握するのには便利な方法であると考えられる。

この方法は、その求め方から体積熱容量の測定値と推定値の関係が 1 : 1 直線に近づくほど、即ち、式 (10) または式 (11) の傾きが 1、切片が 0 に近いほど精度よく θ_{NAPL} を推定できる。今回の実験の体積熱容量の測定値と推定値の差が、実験誤差によるものなのか、モデルの限界によるものなのかは、さらに実験を重ねる必要があると考

える。

(3) 回帰直線を用いた間接的な NAPL 含有率の推定

前述の (2) より、土壌中の体積熱容量の測定値を体積熱容量の推定モデルに直接代入してもある程度の精度で θ_{NAPL} を推定できることがわかった。ここでは、体積熱容量の測定値と推定値の関係から得られた式 (10) と式 (11) を用いて体積熱容量の測定値を補正し、その補正値を体積熱容量のモデル式に代入して θ_{NAPL} を推定する。こうして得られた θ_{NAPL} の測定値と推定値の結果を図 7 に示す。RMSE は、LNAPL で $0.039\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.92$)、DNAPL で $0.038\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.92$) となり、(2) で求めた推定値よりも精度が向上し、(1) の方法による推定値とほぼ同程度の精度が得られた。このことは、図 6 において、LNAPL と DNAPL とともに 1 : 1 直線の回りにほどよくデータが集まっていることからわかる。この推定法は、体積熱容量の測定値と推定値の関係から事前に得られた回帰直線を用いるので、(2) の方法とは異なり間接的な方法であるが、(1) で示したような従来型のキャリブレーション式とは異なる新しい方法である。

図 6 体積熱容量から推定した θ_{NAPL} と既知の θ_{NAPL} の関係

Fig. 6 Relationship between the known and the estimated NAPL contents using the measurements of volumetric heat capacity

表 2 各推定法における θ_{NAPL} の推定値に対する RMSE (2 乗平均平方根誤差) と r^2 (適合度)

Table 2 RMSE and r^2 for the estimated θ_{NAPL} in the methods of (1), (2), and (3)

	(1)		(2)		(3)	
	r^2	RMSE	r^2	RMSE	r^2	RMSE
LNAPL (ヒマシ油)	0.95	0.031	0.68	0.076	0.92	0.039
DNAPL (HFE-7100)	0.93	0.037	0.65	0.081	0.92	0.038

図7 回帰直線を用いた体積熱容量から推定した θ_{NAPL} と既知の θ_{NAPL} の関係

Fig. 7 Relation between known NAPL content and estimated NAPL contents using regression line

6. まとめ

本研究では、NAPLで汚染された飽和砂土の体積熱容量を測定し、その値と土壌の体積熱容量の推定モデルを用いて飽和砂土中のNAPL含有量の新たな推定手法について検討した。得られた知見を要約すると以下ようになる。

(1) 飽和砂土中における設定NAPL含有率と体積熱容量の測定値の関係からキャリブレーション式をLNAPL、DNAPLそれぞれについて示した。また、このキャリブレーション式を用いることで、体積熱容量の測定値から容易に、かつ精度良くNAPL含有率が求められることを示した。

(2) 体積熱容量の測定値を土壌の体積熱容量の推定モデルに直接代入し、逆算することで θ_{NAPL} の推定を行った。LNAPLとDNAPLのRMSEは、それぞれ $0.076\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.68$)、DNAPLで $0.081\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.65$) となり、ある程度の精度で推定できることを示した。

(3) 体積熱容量の測定値と推定値の関係式を用いて補正した体積熱容量の値を土壌の体積熱容量の推定モデルに代入してNAPL含有率を求めたところ、RMSEは、LNAPLで $0.039\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.92$)、

DNAPLで $0.038\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ($r^2=0.92$) となり、(2)で示した手法よりも推定精度が向上した。また、(1)の方法による推定値とは、ほぼ同程度の精度が得られた。この方法は、事前に体積熱容量の測定値と推定値の関係式を求めておく必要があるのが、一種のキャリブレーション式と言えるが、(1)で示したような従来型のキャリブレーション式とは異なる新しい考え方であることが示された。

参考文献

- 西垣 誠・小松 満・金 萬鎰 (2004): FDR法による土壌・地下水汚染のモニタリング手法に関する基礎的研究、地下水学会誌、46、2、145-157。
- 登尾浩助 (2005): サーモ TDR プローブによる不飽和土壌中の有機汚染物質濃度の測定、土木学会論文集 No. 783/VII-34、33-38。
- 望月秀俊・小岩崎真・須甲武志 (2007): ナタネ油を混合した洗浄鳥取砂丘砂の熱伝導率とそのモデル化、土壌の物理性、105、59-65。
- Ajo-Franklin, J.B., J.T. Geller, and J.M. Harris (2004): The dielectric properties of granular media saturated with DNAPL/water mixture. *Geophy. Res. Lett.*, 31, L17501 10, 1029/2004GL020672.
- Bristow K.L. R.D. White and G.J. Kluitenberg (1994): Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating, *Aust. J. Soil Res.*, 32, 447-464.
- Bristow K.L. Bilski J.R. G.J. Kluitenberg and R. Horton (1995): Comparison of techniques for extracting soil thermal properties from dual-probe heat-pulse data, *Soil Sci.*, 160, 1-7.
- de Vries D.A. (1963): Thermal properties of soils, In W.R. van Wijl (ed.), *Physics of plant environment*, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 210-235.
- Kluitenberg, G.J., J.M. Ham, and K.L. Bristow (1993): Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity, *Soil Sci. SocAm. J.*, 57, 1444-1451.
- Legates, D.R. and G. J. McCabe (1999): Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.*, 35, 233-

241.

- Persson, M. and R. Berndtsson (2002): Measuring nonaqueous phase liquid saturation in soil using time domain reflectometry, *Water Resour. Res.*, 38(5), 1064, doi: 10.1029/2001WR000523.
- Noborio, K., K.J. McInnes, and J.L. Heilman (1996): Measurements of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe, *Soil Sci.*, 161, 22-28.
- Redman, J.D. and S.M. DeRyck (1994): Monitoring non-aqueous phase liquids in the subsurface with multilevel time domain reflectometry probes. *Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, Spec. Publ. SP19-94, NTIS PB95-105789, 207-215, U.S. Bur. of Mines, Washington, D.C.
- Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16, 574-582.

(受付: 2007年5月9日、受理: 2007年11月5日)